

マルチストランドケーブルの付着挙動の推定に関する検討

神鋼鋼線工業(株) PC鋼線技術室	正会員	○細居	清剛
住友電工スチールワイヤー(株) PC技術部			市来 隆志
神鋼鋼線工業(株) 開発部	正会員	白濱	昭二
大阪工業大学 工学部 空間デザイン学科	正会員	中塚	侑

An accurate understanding of concrete member deformation is essential to the optimal design of prestressed concrete structures. However, our current understanding of concrete member deformation remains incomplete, and member capacity at guaranteed limit states have not been thoroughly investigated. One major reason for this state of affairs is our incomplete understanding of the bonding properties between grout and prestressing steel.

In recent years, the bonding properties of the singlestrand cable are being evaluated. However, the properties of the multistrand cable are still uncertain, which is commonly used in actual prestressed concrete structures.

The study described herein evaluated the bonding properties between grout and multistrand cable, considering the effects of layout of strands in the sheath. In addition, it was discussed that an estimate bond strength of multistrand cable from the bond strength of single strand cable.

Key words : Grout, Prestressing Strand, Multistrand cable, Bond Property

1. はじめに

部材変形の把握は、これからのPC構造の性能設計に不可欠であると考えられる。しかし、現状ではPC部材の変形を明確に把握することは出来ておらず、したがって設計限界変形時における部材耐力を精度良く評価することも成しえていない。その大きな理由の一つに、部材変形に顕著な影響を及ぼすPC鋼材とグラウトとの付着性状が十分明らかでないことが挙げられる。

近年、PC鋼より線の基本的な付着機構は明らかになりつつあるものの、それらはシングルストランドケーブルに関する知見がほとんどであり、実部材に一般的に使用される事が多いマルチストランドケーブルについての付着特性はほとんど不明である。

本研究では、これまで皆無といってよいほど行なわれてこなかったマルチストランドとグラウトとの付着実験を、PC部材中のシース内でのケーブルの配置形状に着目して行い、マルチストランドの付着挙動を調べた。同時に、初めての試みとしてシングルストランドの付着挙動と比較することから、マルチストランドの付着強度を前者の付着強度から推定する方法についても検討した。

2. マルチストランドケーブルのシース内での配置形状

マルチストランドケーブルはシングルストランドケーブルの集合体であるため、1本のストランドを素線とみなせば、近似的に太径のシングルストランドケーブルとみなすことが出来る。両者の違いは、ケーブルを構成するストランドのシース内での配置状況である。シース内におけるストランドの予想される配置状況の概要を図-1に示す。

(a)はアンカーヘッドから延びたケーブルがトランペットシースと一般シースとの接合部で絞られた断面に見られる形状である。曲線配置の場合、一般のシース断面では見られることは少ないと考えられ

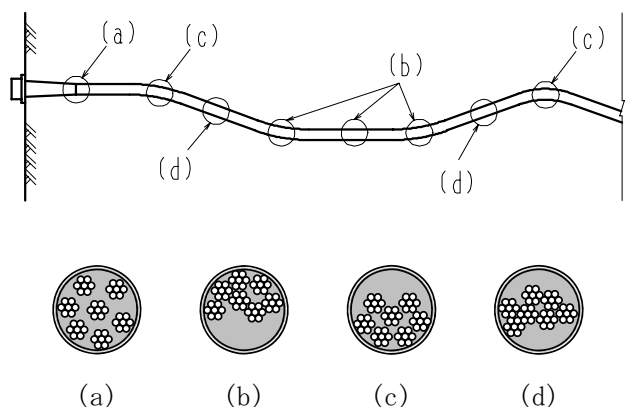


図-1 シース内でのストランドの配置

るが、直線配置の場合には全長にわたってこのような配置となる。(b)および(c)は、曲線配置の場合の曲げ上げ部および曲げ下げ部で見られる形状であり、(d)はその中間部で見られる形状である。したがって、一般的に最も多く見られる配置形状は(d)を基本とし、(b)あるいは(c)に移行していく形状であると考えられる。すなわち、マルチストランドケーブルのシース内での配置形状は、楕円あるいは長方形に近く、さらにその周囲はグラウトに囲まれているものと考えられる。

もう 1 つの相違点である撚りの有無については、シングルストランドケーブルも素線が撚られているものの、グラウトから抜け出すときにはストランド自体が自由に回転することは無い。したがって、マルチストランドケーブルの付着挙動も、基本的には拔出しに回転を伴わないシングルストランドケーブルとほぼ同等であると考えられる。

3. 実験概要

3.1 試験体

マルチストランドケーブルのシース内での配置形状の違いが付着挙動に与える影響を確認するために、以下のような付着試験を行った。

試験要因はシース内でのストランドの配置形状である。基本となる付着強度確認用としてシングルストランドケーブルをシース中央に配置したもの(1SC)、7本マルチストランドケーブルを正六角形に配置してシース中央に配置したもの(7SC)、シース内で各ストランドが均一に分散したもの(7SD)、扁平に配置したものをシース壁面(7SE)およびシース中央(7SF)に配置したものの5種類とした。試験体一覧を表-1に示す。

試験体は、コンクリートブロックの中央部に配置された鋼製のスパイラルシースに、所定の配置形状でPC鋼より線 15.2mm を挿入し、形状を保持するための成型スペーサを取付け、シース内にグラウトを注入して製作した。なお、自由端側のPC鋼より線の回転を拘束するため、ストランドの端面と成型スペーサは溶接により固定されている。コンクリート試験体の例(7SC)を図-2に示す。なお、グラウトのW/Cは45%、混和材はGF-1720を使用し、コンクリートの呼び強度は36N/mm²、粗骨材の最大寸法は20mmとした。

3.2 試験方法

試験装置を図-3に示す。試験体数は各種類3体とした。試験はグラウト注入後6日目で行い、養生は室内養生とした。

荷重は単調荷重とし、図-2に示す成型スペーサによって、グラウト中のストランド群の断面形状が保持された状態で荷重を行った。また、ストランド群のグラウト中での偏心量は、7SEで概ねシース内径の1/5程度、それ以外は0であり、7SEのみ多少偏心の影響を受けていることになる。なお、実際にはケーブルの曲げ上げ部および曲げ下げ部で付着面に側圧が作用するが、今回の実験ではその影響は考慮しなかった。

表-1 試験体一覧

記号	配置形状	シース形状
1SC		1SC :
7SC		
7SD		
7SE		
7SF		

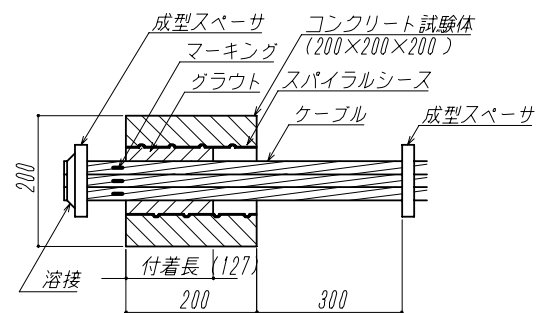


図-2 コンクリート試験体 (7SC)

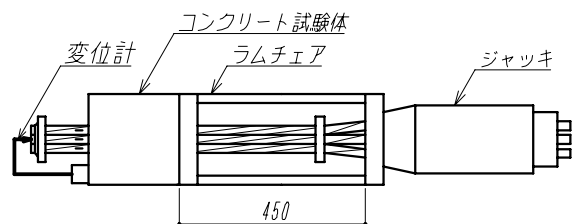


図-3 試験装置

ケーブルのすべり量は、図-3 に示すように変位計により測定したコンクリート試験体に対するケーブルの相対変位とした。荷重はジャッキポンプの油圧から換算し、載荷速度はすべりが生じるまでは荷重制御で 10~20N/mm²/min とし、すべりが生じた後は変位制御で 40~70mm/min とした。また、自由端の回転は成型スパーサによって拘束されているものの、載荷端側の拔出し時の撚りの戻りによってコンクリートブロック自由端側近傍のストランドには回転が生じることが予想されるのため、マーキングを行うことによって、ケーブル拔出し時におけるストランドの回転角を確認した。

4. 実験結果および考察

4.1 最大引抜き荷重

試験結果一覧を表-2 に示す。なお試験時のグラウト強度は 31.0N/mm²、コンクリート強度は 41N/mm²であった。

表-2 によれば、7本のストランドがお互いに接触して配置されている 7SC, 7SE, 7SF 試験体 (接触配置試験体) については、ほぼ同様の最大引抜き荷重を示し、1SC 試験体 (シングル試験体) の同荷重の約 4.5 倍であった。また、拔出し量が 25mm に達した時点での、各ストランド自由端のマーキング位置により測定したストランド回転角は 0° であった。すなわち、マルチストランドケーブルにおいて、ストランド同士が接触してシース内に配置されている場合、そのストランド群がシース内でどのような位置に配置されているかにかかわらず、その最大引抜き荷重はほぼ同等であるということを示している。これは、ケーブルを構成するストランドが接触して配置されることによって、それぞれのストランドの回転が拘束され、ケーブルが抜け出すときには各ストランドは回転することなく、ケーブル群が一体となって抜け出てくるためであると考えられる。ストランド表面には素線の撚り形状が存在するため、これは異形鋼棒のグラウトからの拔出しと同様な挙動であると言える。また、接触配置試験体の最大引抜き荷重がシングル試験体の最大引抜き荷重の約 4.5 倍であったのは、以下の理由であるとされる。

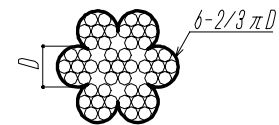
接触配置試験体のうち各ストランドが整然と配置されている 7SC 試験体の場合、図-4 の(a)から想定されるように、外側の6本のストランドの全周の 2/3 がグラウトと接触していると仮定すると、その周長は 4πD となり、7SC 試験体は 1SC 試験体の 4 倍の周長を持つことになる。また、同じ接触試験体で各ストランドが扁平に配置されている 7SF 試験体の場合も同様に、図-4 の(b)から想定されるように、7本のストランドのうち3本の全周の 1/2 と、2本の全周の 2/3 および2本の全周の 5/6 がグラウトと接触していると仮定すると、その周長は 1SC 試験体の周長の 4.5 倍となる。さらに 7SE 試験体も同程度の周長

表-2 試験結果一覧

記号	最大引抜き荷重, kN	ストランド回転角*1	引抜き荷重比*2
1SC-1	15.6	約 45°	—
-2	18.1	約 45°	—
-3	19.3	約 45°	—
平均	17.7	—	—
7SC-1	82.2	約 0°	4.6
-2	79.7	約 0°	4.5
-3	79.1	約 0°	4.5
平均	80.3	—	4.5
7SD-1	57.3	約 30°	3.2
-2	74.1	約 30°	4.2
-3	68.5	約 30°	3.9
平均	66.6	—	3.8
7SE-1	82.2	約 0°	4.6
-2	87.2	約 0°	4.9
-3	77.2	約 0°	4.4
平均	82.2	—	4.6
7SF-1	76.6	約 0°	4.3
-2	77.2	約 0°	4.4
-3	82.8	約 0°	4.7
平均	78.9	—	4.5

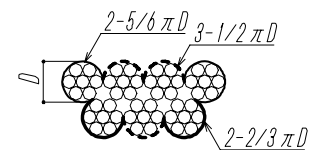
*1: 拔出し量が 0mm から 25mm に達するまでのストランド自由端のストランドの軸に対する回転角。目視により測定。

*2: 1SC の最大引抜き荷重の平均値に対する各試験体の最大引抜き荷重の比。



$$\text{周長} : L_{7SC} = \frac{2}{3} \pi D \times 6 = 4\pi D$$

(a) 7SC 試験体の周長



$$\begin{aligned} \text{周長} : L_{7SF} &= \frac{1}{2} \pi D \times 3 + \frac{2}{3} \pi D \times 2 + \frac{5}{6} \pi D \times 2 \\ &= 4.5\pi D \end{aligned}$$

(b) 7SF 試験体の周長

図-4 接触配置試験体の周長

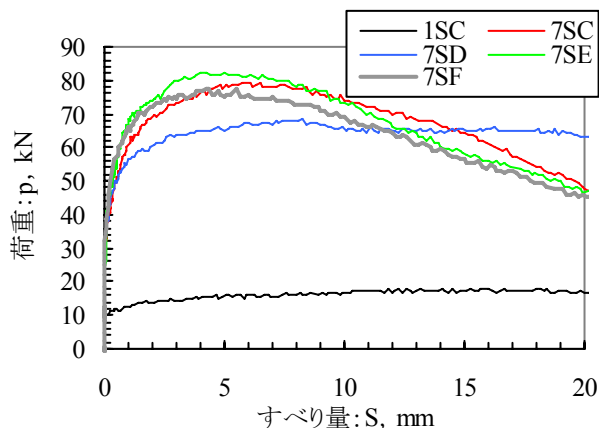


図 - 5 荷重とすべり量の関係

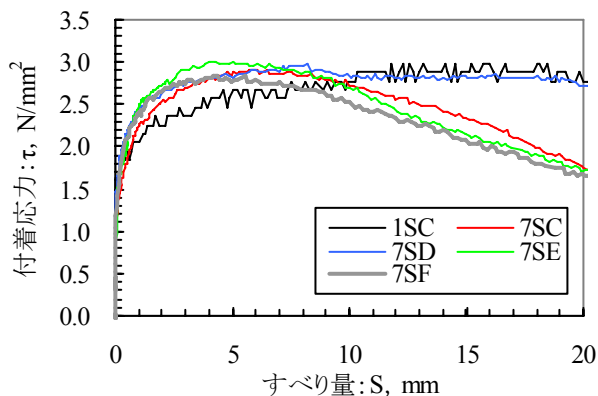


図 - 6 付着応力とすべり量の関係

を持つと考えられる。すなわち、接触試験体はシース中での配置形状にかかわらず、シングル試験体の4倍～4.5倍程度のグラウトとの付着面積を有していると考えられる。したがって、シングル試験体の抜き出しがグラウトに形成された撚り溝に沿ったストランドの回転を伴うものであり、回転を拘束することによる引抜き荷重の増加がないことを考慮すると、接触配置試験体の最大引抜き荷重がシングル試験体の最大引抜き荷重の約4.5倍であったのは概ね妥当な結果であると思われる。

一方、7本のストランドが分散して配置されている7SD試験体(分散配置試験体)は、ケーブルを構成するすべてのストランドの全周がグラウトに接触しているため、シングル試験体の7倍の付着面積を持つ。しかし、その最大引抜き荷重はシングル試験体の約3.8倍程度であった。これは、分散して配置されているため、試験時にすべてのストランドに一律な引張り荷重が作用していなかったことや、各ストランドが回転しながら抜け出した事も一因であると考えられるが、明確な原因は不明であり、今後の課題である。ちなみに、ストランドの自由端が拘束されていないシングル試験体のストランド回転角が45°であり、ストランド自由端が成型スペーサとの溶接により拘束されている分散配置試験体のストランド回転角が30°であったことから、分散配置試験体の各ストランドは、抜け出しにともなって、撚りの戻りが発生したものと思われる。

4.2 τ-S 関係

各試験体の代表的な荷重-抜き出し量関係を図-5に示す。また、前述の結果より、接触配置試験体のグラウトとの付着面積をシングル試験体の付着面積の4.5倍として算出した付着応力-抜き出し量関係(τ-S 関係)を図-6に示す。また、分散配置試験体の付着挙動を確認するために、付着面積をシングル試験体の3.8倍として算出したτ-S 関係を参考として併せて示した。なお、すべりはすべてグラウト-ケーブル間で発生し、シース-グラウト間およびシース-コンクリート間ではすべりは発生しな

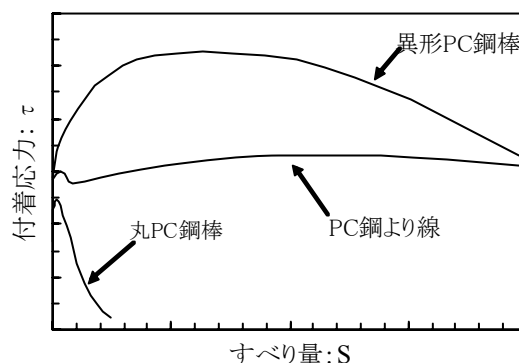


図-7 各種PC鋼材のτ-s 関係

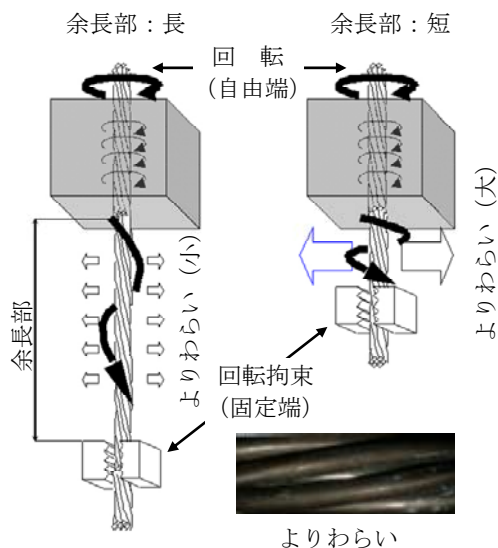


図-8 より線の回転が抑制された状況での付着機構

かった。

図-6によれば、接触配置試験体はすべて同様な σ - S 関係を示し、その曲線形状は徐々に剛性低下した後ピークに達し、その後緩やかに応力を減ずるというものであった。一方、分散配置試験体とシングル試験体は同様な傾向の σ - S 関係を示した。それは接触配置試験体に比べてやや大きな剛性低下した後ピークに達するが、その付着応力を保持したまま抜け出していくというものであった。

一般に、PC鋼材とグラウト間の σ - S 関係は、PC鋼材の種類によって図-7に示すような相違を示す^{1,2,3)}。すなわち、表面が平滑である丸PC鋼棒の場合は、拔出が生じた直後に急激な付着応力の低下が見られるが、異形PC鋼棒の場合には、PC鋼棒の拔出が生じた後もその勾配を変化させながら付着応力は増加し続け、最初のピークを迎えた後に付着応力は低下していく。

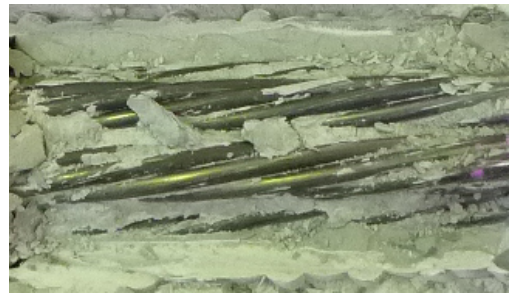
これらの付着挙動の違いは、筆者らがシングルストランドケーブルに関して行ってきたこれまでの研究^{1,2)}から、以下のように考えられる。

一般にコンクリート中にある鉄筋の付着抵抗の発生機構は、(a)コンクリート中のセメントペースト硬化体と鋼材との化学的粘着、(b)鋼材表面での摩擦、および(c)機械的抵抗の3つの作用に分類することができる⁴⁾。これらをPC鋼材に適用した場合、丸PC鋼棒では低応力レベルで鋼材とコンクリートの間ですべりが発生すると、(a)の抵抗作用は無くなり、その後は(b)の摩擦が作用するが、表面形状が平滑であるためその抵抗は小さく、さらに(c)の機械的抵抗も期待できないということになる。それに対して異形PC鋼棒の場合は、(c)の機械的抵抗が期待できるため、丸PC鋼棒に比べて付着強度は著しく増大する。

一方、PC鋼より線の場合、付着応力はPC鋼より線とグラウト間の粘着力が消失した時点で一旦低下し、その後徐々に回復していくという、PC鋼棒とは異なった付着性状を示す。これは、PC鋼より線はグラウトから抜け出す際にはグラウトに形成された撚り溝に沿って回転しながら抜け出そうとするが、引張側の鋼材端部は試験機によって固定されているため、その回転が抑制されるためと考えられる。すなわち図-8に示すように、グラウトに形成されたより線の溝に沿う回転が拘束されるとPC鋼より線には固定端との間で撚りにゆるみが生じるので、より線とグラウトとの界面に腹圧力を生じる。さらに拔出し量が増加すると、やがて「撚りわらい」というPC鋼より線の素線が塑性変形して開いたままになる現象を生じ、その抵抗力は一層増加す



(a) 1SC (シングル試験体)



(b) 7SC (接触配置試験体)



(c) 7SD (分散配置試験体)



(d) 7SE (接触配置試験体)



(e) 7SF (接触配置試験体)

図-9 試験後の試験体内部グラウト状況

る。ちなみに「撚りわらい」による抵抗力は、余長部が短いほど大きくなる。

今回の試験から得られた τ - S 関係を図-7に照らし合わせると、接触配置試験体の τ - S 関係は異形PC鋼棒のそれに類似するものであった。これは前節でも述べたとおり、接触配置試験体はケーブルが抜け出すときには各ストランドは回転することなくケーブル群が一体となって抜け出てくるためであり、さらにストランド表面には、異形PC鋼棒のふしに対応する素線の撚り形状が存在するためであると考えられる。これは、図-9に示す試験後の内部グラウト状況からもわかるように、ストランド群がグラウトを破壊しながら抜け出すという異形PC鋼棒と同様な挙動を示していることから確認できる。

一方、分散配置試験体はシングル試験体と同様な傾向の τ - S 関係を示し、その形状は図-7におけるPC鋼より線に相当するものであった。これは、分散配置試験体を構成する各ストランドは、シングル試験体が独立して配置されたものであることを考えると、妥当な結果である。これは、図-9に示す試験後の内部グラウト状況からもわかるように、シングル試験体と分散配置試験体では、グラウトに形成されたストランドの撚り溝が試験後も残っており、それに沿ってストランドが抜け出していることから確認できる。さらに、拔出しが生じた後の τ - S 関係の上昇域での勾配が、シングル試験体、分散配置試験体、接触配置試験体の順で大きくなっているのは、拔出し時のストランド回転角がそれぞれ 45° 、 30° 、 0° というように回転拘束の度合いが大きくなっており、それに伴い付着応力が増加したためであると考えられる。

5. 結 論

本研究における結論は、以下のとおりである。

- (1) PC部材中におけるシース内で最も一般的なケーブル配置であると考えられる接触配置の場合、それぞれのストランドの回転が拘束され、ケーブルが抜け出すときには各ストランドは回転することなく、ケーブル群が一体となって抜け出てくる付着挙動を示す。すなわち、このケースでの付着応力-すべり（ τ - S ）関係は異形PC鋼棒と同様な曲線形状を示す。
- (2) 接触配置の7本マルチストランドケーブルの付着強度は、シングルストランドケーブルの付着強度に推定される付着面積（シングルの場合の約4.5倍）を用いて推定することが出来る。

今後の課題としては、分散配置の場合の付着強度を推定するための付着面積を設定すること、および7本マルチストランドケーブル以外の構成のケーブルについても付着強度を推定するための付着面積を設定すること等である。さらに、任意のグラウト強度でのマルチストランドケーブルの付着強度を、そのグラウト強度に応じたシングルストランドケーブルの付着強度から推定することを検討することも今後の課題である。

なお、本研究はPC付着研究会（構成者：大阪工業大学・中塚侑，オリエンタル白石，建研，高周波熱錬，神鋼鋼線工業，住友電工スチールワイヤー，ピーエス三菱）の活動の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 細居清剛，市来隆志，中塚侑：グラウト-PC鋼材の付着強度試験方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，第24巻，第2号，pp.811-816，2002
- 2) 細居清剛，市来隆志，中塚侑：PC鋼より線とグラウトの付着特性に関する研究，第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.77-80，2003
- 3) 飯干福馬，溝口茂，中塚侑：PC鋼棒-グラウト-シース系の付着特性に関する実験的検討，第17回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.397-402，2008
- 4) 例えば，小林和夫：コンクリート構造学，森北出版，pp.37，1995